

## 大気輸送モデルを用いた数値実験に基づく 北半球陸上起源炭素フラックスの季節変化の考察

井口敬雄・木田秀次\*

\* 京都大学大学院理学研究科

### 要 旨

三次元大気輸送モデルを用いて二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の輸送実験を行い、分割された陸上領域から一ヶ月間放出されるフラックスの地球上の各観測点におけるCO<sub>2</sub>濃度に対する寄与の大きさを計算した。その結果を観測値やSim-CYCLEを用いたシミュレーションの結果と比較し、北半球中高緯度における陸上炭素フラックスの季節変動について考察を行った。その結果、北米大陸北部やシベリア周辺では夏季に強い吸収があり、これが北半球高緯度におけるCO<sub>2</sub>濃度季節変動の大きな振幅の原因となる事が示された。また、Sim-CYCLEと現実の生態系との最も大きな違いはこれらの地域におけるこの季節の強い吸収であることも示唆された。

**キーワード：** 二酸化炭素, 植生, 輸送モデル, 陸上生態系

### 1. はじめに

大気中における二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の増加は大規模な気候の変動をもたらし、人間社会に深刻な影響を及ぼす恐れがある(IPCC,2001)としてその動向が注目されている。大気中CO<sub>2</sub>の主な放出源(ソース)や吸収源(シンク)としては化石燃料の燃焼、土地利用、海洋、陸上生態系があり、濃度の変動を予測するためにはこれらの放出源・吸収源と大気との炭素のやり取りの詳細なメカニズムを解明することが必要であるが、化石燃料を除いては依然として不明な点が多い。

CO<sub>2</sub>フラックスの研究には大きく分けて二通りの方法がある。一つはソースまたはシンクそのものを研究する方法である。この方法はさらに、森林の上空でCO<sub>2</sub>濃度を測定(Yamamoto et al., 1999)したり、海洋表層水とその上空とのCO<sub>2</sub>分圧差を測定(Tans et al., 1990)したりして、直接的にフラックスを求める方法と、生態系や海洋における炭素のダイナミクスを解明してこれを数値モデル化し、シミュレーションによりフラックスを推定する(Murnane et al., 1999; Ito and Oikawa, 2002)方法に分けることが出来る。

もう一つの方法は大気中CO<sub>2</sub>濃度の観測値からフラックスを逆に推定する方法である。この方法には、大気輸送モデルを用いたシミュレーションによるCO<sub>2</sub>濃度が観測値と最も合うような地表面フラックス分布を求める逆転法(Inversion problem)(Bousquet et al., 2000; Gurney et al., 2003)や、ソースやシンクの種類により放出されるCO<sub>2</sub>の同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ )が異なる事を利用して、大気中における $\delta^{13}\text{C}$ の変動を測定してどの種類のソース・シンクからどれだけのCO<sub>2</sub>が放出されているかを推定する方法(Aoki et al., 2003)などがある。前者のソース・シンクそのものの研究からフラックスを推定する方法は“ボトム・アップ”、後者の大気中CO<sub>2</sub>濃度観測値からフラックスを推定する方法は“トップ・ダウン”と呼ばれているが、両者の間にはまだ様々な食い違いが存在しているのが現状である。

井口・木田(2004,2005)は、大気輸送モデルと陸上生態系モデルSim-CYCLE(Ito and Oikawa, 2002)を用いて大気中CO<sub>2</sub>濃度分布のシミュレーションを行い、大気-植生間の炭素交換について考察を行った。シミュレーションの結果と観測値との間には幾つかの食い違いが見られ、その中でも特にフラックスの季節変化の違いは重要な課題として示された。

そこで輸送モデルを用いた逆転法により陸上生態系起源のフラックスを季節変化も含めて推定し、その結果も考慮してSim-CYCLEの改良を行っていき事にした。

逆転法によるフラックス推定には膨大な数のシミュレーションを行う必要があるが、その中からまず、大気中CO<sub>2</sub>濃度の季節変動はそのほとんどが陸上生態系からのフラックスの季節変動に依存している点を考慮し、陸上の区分された領域の一つから1ヶ月間CO<sub>2</sub>を放出させる実験を全領域と12ヶ月分全てについて行った。本論文では各領域・月間フラックスが北半球中高緯度に位置する幾つかの観測点の位置に及ぼすCO<sub>2</sub>濃度変化について示し、観測される濃度の季節変化の要因について推測すると共に、Sim-CYCLEを用いて行ったシミュレーションの結果が観測値と食い違う原因についても考察を行う。

## 2. 使用したモデルおよびデータ

### 2.1 大気輸送モデル

大気中のCO<sub>2</sub>濃度を再現する三次元の大気輸送モデルは井口・木田が開発したものをを用いている。本モデルは大気をグリッドボックスに分割し、隣り合うボックス間のフラックスを計算する方法でトレーサーの輸送を行い、質量の保存を保証する。水平解像度は2.5°×2.5°、鉛直14層（σ座標）で上部境界は10hPa、タイムステップは20分である。

### 2.2 大気再解析データ

2.1の大気輸送モデルは風速などの大気データを外部から読み込んで輸送を行う。本研究ではECMWF/TOGAの再解析データを用いた。データの水平解像度は2.5°×2.5°、鉛直14層（p座標、上部境界は10hPa）および地表面データで、タイムステップは12時間である。これを輸送モデルのグリッドとタイムステップに合わせて空間的・時間的に内挿を行って使用している。

### 2.3 地表面炭素フラックスデータ

地表面におけるCO<sub>2</sub>フラックスはTransCom3 Layer2で用いられるLandunit carbon flux dataを用いた。このデータはTransComプロジェクトのホームページ(<http://www.purdue.edu/transcom/>)からダウンロードすることが出来る（2006年4月現在）。Landunit carbon flux dataは南極とグリーンランドを除く陸地を11の領域に分け、領域毎に水平解像度0.5°×0.5°のグリッドデータが与えられている。本研究

では1領域から1ヶ月に放出される炭素の量が丁度1GtCとなるよう調整を加えている。

## 3. シミュレーションの手順

CO<sub>2</sub>濃度の初期状態は350ppmvで全球均一とする。最初の1ヶ月間、11に区分された領域の一つから合計1GtCのCO<sub>2</sub>を放出させながら輸送を行い、放出を止めてさらに1年間大気中の輸送を行う。これは1年間も輸送を行えば、放出されたCO<sub>2</sub>は大気中でほぼ均一になるという仮定の下に行った。この実験を11の領域全てについて、1989年1月から1990年12月までの各月の放出とその後1年間の輸送を行った。

シミュレーションによる各観測点での濃度の増加分は、1990年の観測値および、同じ1990年のデータを用いて行われたSim-CYCLEと輸送モデルによるシミュレーションの結果と比較し、季節変動の要因やSim-CYCLEの課題点について検討を行った。

## 4. シミュレーションの結果

11に区分された陸上領域の一つ、北アメリカ大陸北部から1989年4月に放出された1GtCのCO<sub>2</sub>フラックスが北極点に及ぼした濃度上昇の月平均値をFig.1に示す。最初の月は濃度が上昇の途中にあり、2ヶ月目に濃度は最大になる。その後時間と共に濃度は減少していき、最終的には初期状態に比べて0.5ppmv弱の増加で落ち着く（1年後ではまだ濃度は減少傾向が見られる）。次に同じ領域と年・月に放出された1GtCのCO<sub>2</sub>フラックスが南極点に及ぼした濃度上昇の月平均値をFig.2に示す。こちらの方は放出されたCO<sub>2</sub>の到着に時間がかかるため、4ヶ月経った8月から濃度の上昇が始まる。そして1年後には初期状態から0.4ppmv強の上昇で落ち着くものと見られる。こうした濃度の変化の大きさやタイムラグの大きさはフラックスの位置と観測点との距離のみでなく、大規模風の強さや方向にも大きく影響される。

Fig.1およびFig.2より、ある地点のある時刻におけるCO<sub>2</sub>濃度には様々な領域からのフラックスが様々なタイムラグと共に影響を与えている事が理解できる。こうした地域・月毎のフラックスと濃度との関連を北半球中高緯度の観測点について調べる事により、濃度の季節変動を生成する陸上からのCO<sub>2</sub>フラックスについて新たな知見を得ると共に、Sim-CYCLEを用いたシミュレーション結果と観測値との食い違いについてその原因を探る手がかりが得られ

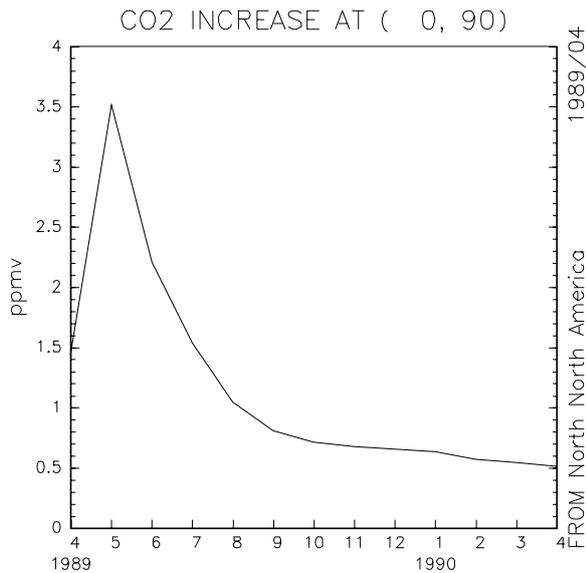


Fig. 1 Monthly mean CO<sub>2</sub> increase from initial value(=350ppmv) at North Pole made by flux of 1GtC during Mar. 1989 from northern North America.

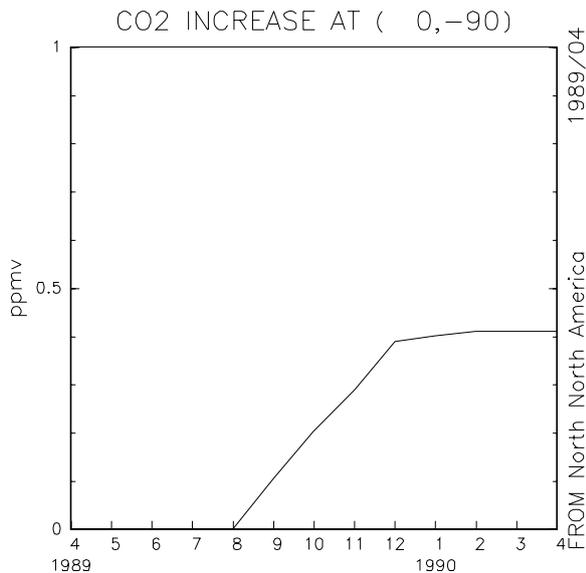


Fig. 2 Monthly mean CO<sub>2</sub> increase from initial value(=350ppmv) at South Pole made by flux of 1GtC during Mar. 1989 from northern North America.

る事が期待できる。

Fig.3は、Alert(82°N,63°W)におけるシミュレーション結果(実線)および観測値(破線)の1990年の月平均CO<sub>2</sub>濃度である。観測値では8月の平均濃度が最も低くなる。この月のCO<sub>2</sub>濃度について分割された陸上領域フラックスとの相関を示したのがFig.4である。Fig.4の右上にある世界地図で示している通り、陸上を(1)ヨーロッパ、(2)シベリア周辺、(3)北アメリカ大陸北部、(4)アジア、(5)北アメリカ大陸南部、(6)アフリカ大陸北部、(7)東南アジア、(8)南

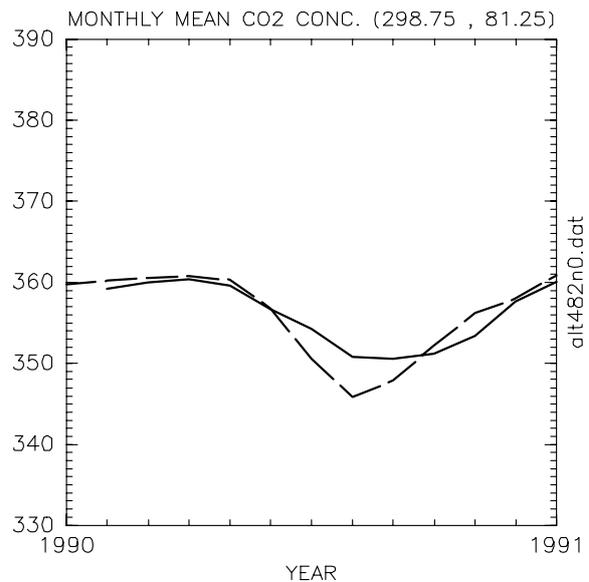


Fig. 3 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Alert (82°N,63°W) in 1990.

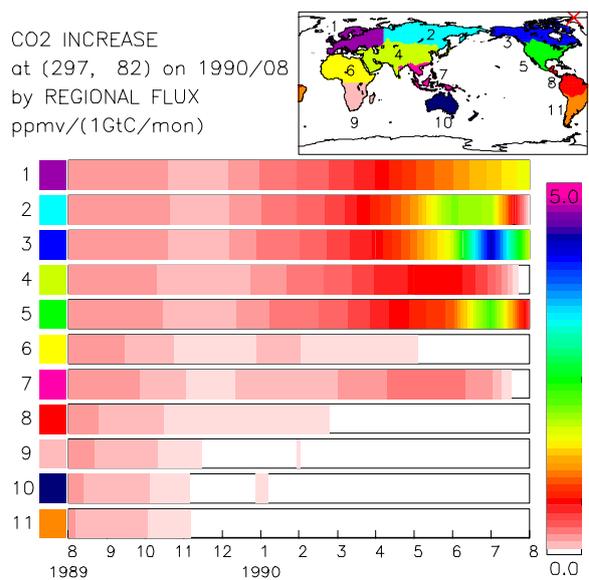


Fig. 4 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Alert (82°N,63°W) on Aug. 1990.

アメリカ大陸北部、(9)アフリカ大陸南部、(10)オセアニア、(11)南アメリカ大陸南部、と11の領域で分割してある。またフラックスとの相関を求めた地点の位置を×印で示してある。Fig.4に示す11本の横長のバーは、各領域から1ヶ月間に放出された1GtCのCO<sub>2</sub>フラックスがその地点に及ぼした月平均濃度の上昇度を過去1年分にあわせて色で示している。各バーの左側にある数字と四角形の色は右上の地図に示してある各領域の数字と色に対応している。Fig.4より、Alertにおける1990年8月のCO<sub>2</sub>濃度は北米大

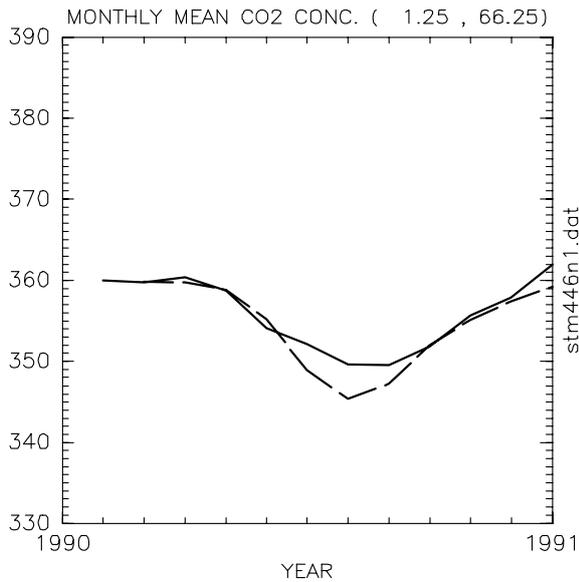


Fig. 5 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Ocean Station 'M' (66°N,2°E) in 1990.

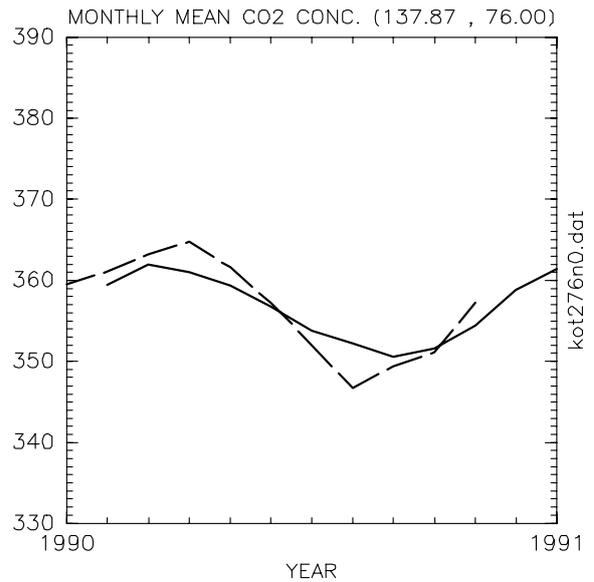


Fig. 7 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Kotelny Island (76°N,138°E) in 1990.

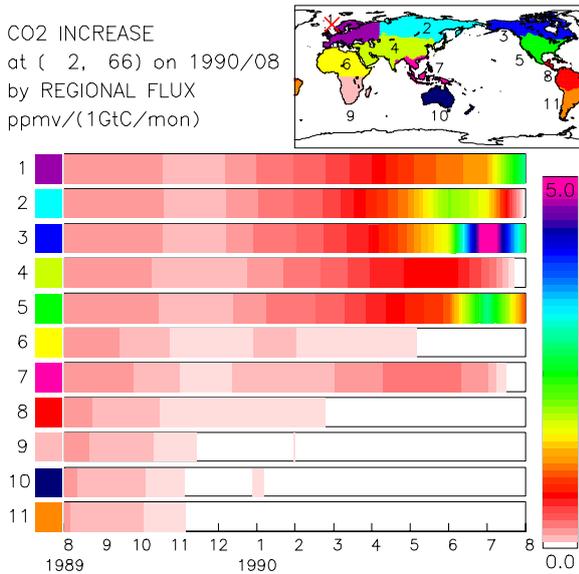


Fig. 6 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Ocean Station 'M' (66°N,2°E) on Aug. 1990.

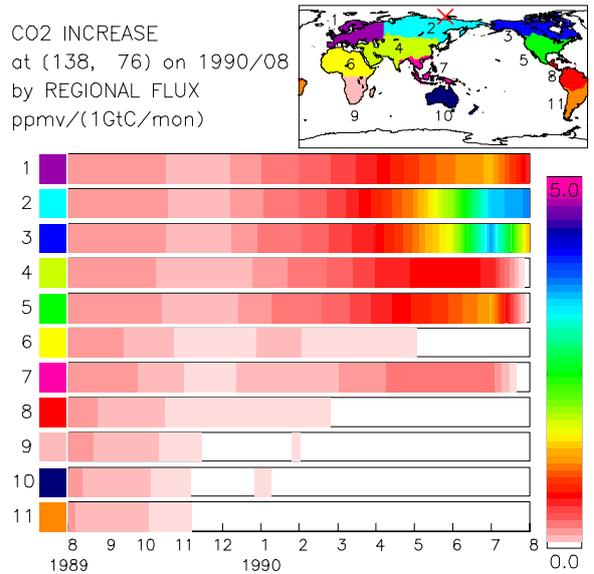


Fig. 8 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Kotelny Island (76°N,138°E) on Aug. 1990.

陸北部から7月に放出されるフラックスと最も強い相関があり、次いで北米大陸南部やシベリア周辺からのフラックスの影響を受けている事が分かる。

Fig.5とFig.6にはOcean Station 'M' (66°N,2°E)における1990年の月平均CO<sub>2</sub>濃度および、1990年8月の濃度変化と領域フラックスとの相関を示した。Ocean Station 'M' は位置的にはヨーロッパに近いが、北米大陸北部からのフラックスの影響の方がヨーロッパよりもはるかに大きい。これはこの季節の大規模風の向きが原因である。また、Fig.7とFig.8

に示したKotelny Island (76°N,138°E)はヨーロッパの東側に位置するにも関わらずヨーロッパからのフラックスとの相関は非常に小さく、観測点の東側に位置する北米大陸北部からのフラックスとの相関の方が大きいくらいである。このように、北極圏またはそれに近い観測点では、1990年8月のCO<sub>2</sub>濃度は北米大陸北部およびシベリア周辺からのフラックスの影響が特に強い事が今回の輸送実験によって示された。上記二つの領域についてはどちらのフラックスとの相関が強いかは場所による。

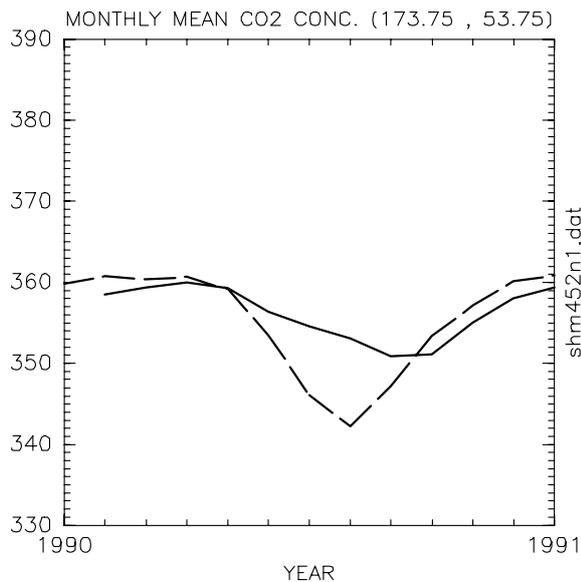


Fig. 9 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Shemya Island (53°N,174°E) in 1990.

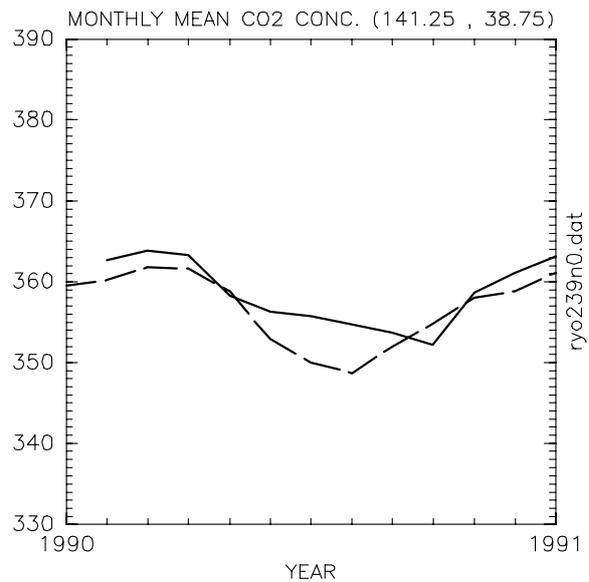


Fig. 11 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Ryori (39°N,142°E) in 1990.

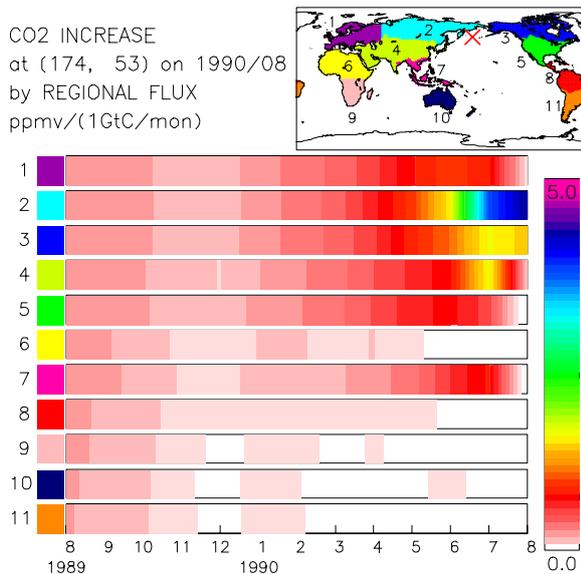


Fig. 10 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Shemya Island (53°N,174°E) on Aug. 1990.

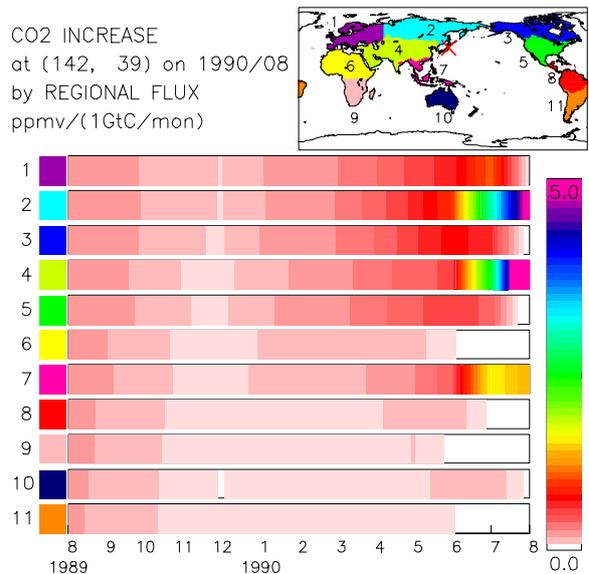


Fig. 12 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Ryori (39°N,142°E) on Aug. 1990.

Fig.9とFig.10はShemya Island (53°N,174°E)における1990年の月平均CO<sub>2</sub>濃度および領域フラックスと8月の平均濃度との相関である。この観測点において観測値とモデル値の季節変動振幅の差が最も大きかった (Fig.9)。そしてこの地点におけるCO<sub>2</sub>濃度はシベリア周辺からのフラックスとの相関が圧倒的に大きい (Fig.10)。しかしそこから低緯度側に位置するRyori (39°N,142°E)ではモデル値と観測値との振幅の差は小さくなり (Fig.11), アジアからのフラックスとの相関が大きくなる (Fig.12)。

Fig.13とFig.14は北米大陸の内陸に位置するNiwt Ridge(40°N,106°W)における1990年の月平均CO<sub>2</sub>濃度および領域フラックスと8月の平均濃度との相関である。この地点においては観測値とモデル値の季節変化は位相・振幅とも良く合っている (Fig.13)。そして夏季の濃度は北米大陸南部のフラックスとの相関が圧倒的に大きい (Fig.14)。Fig.15とFig.16にはヨーロッパに位置するWesterland (55°N,8°E)における1990年の月平均CO<sub>2</sub>濃度および領域フラックスと8月の平均濃度との相関を示した。この

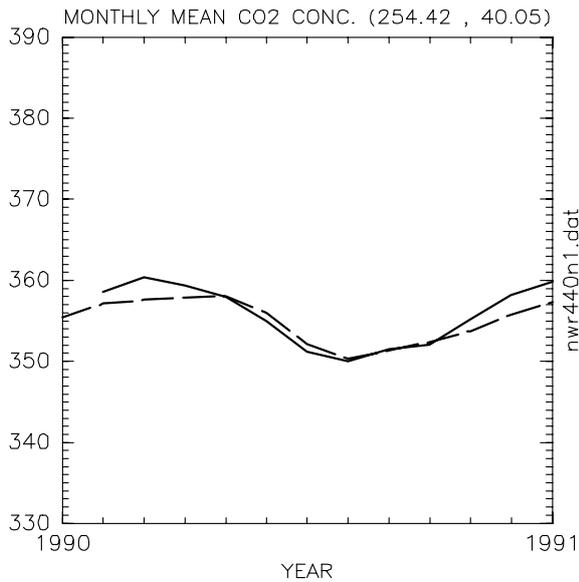


Fig. 13 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Niwot Ridge (40°N,106°W) in 1990.

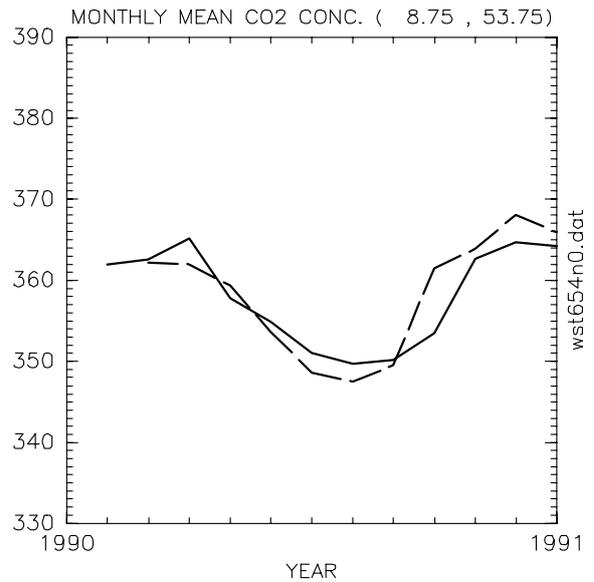


Fig. 15 Monthly mean CO<sub>2</sub> concentration of simulation using Sim-CYCLE (solid line) and observation (broken line) at Westerland (55°N,8°E) in 1990.

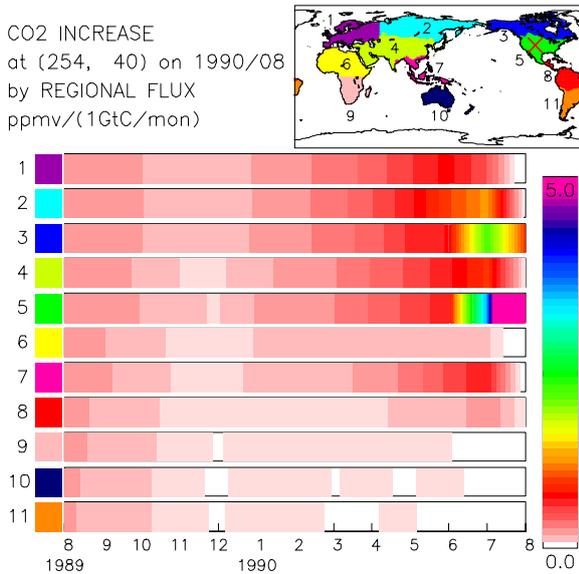


Fig. 14 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Niwot Ridge (40°N,106°W) on Aug. 1990.

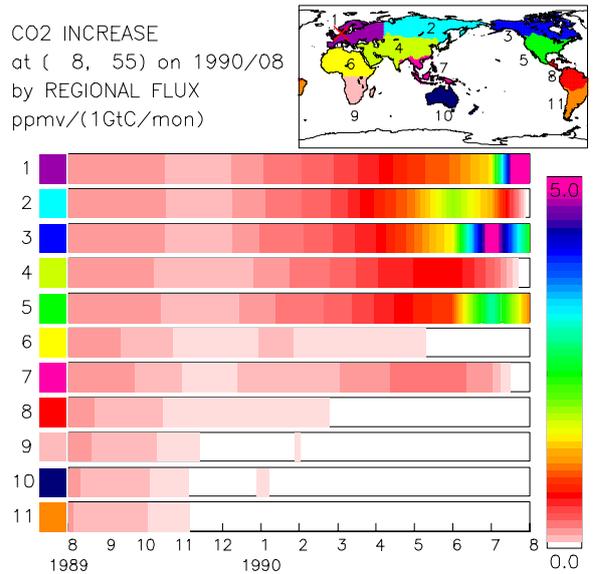


Fig. 16 Increase of CO<sub>2</sub> concentration by 1GtC flux during a month from a terrestrial area at Westerland (55°N,8°E) on Aug. 1990.

地点では位相にずれがあるが季節変化の振幅は良く似ている(Fig.15)。また8月の濃度はヨーロッパとの相関が最も高いが、北米大陸北部からのフラックスのとの相関も高い(Fig.16)。

## 5. 考察

Fig.4,6,8,10,12,14,16を考える上で注意しなければならないのは、これらの図で示しているのは一つの領域から一ヶ月間計1GtCのCO<sub>2</sub>を放出させるという

シミュレーションによって得られた濃度の上昇度であり、現実のCO<sub>2</sub>濃度の季節変動における寄与の大きさを示しているものではないという事である。したがって、Fig.4,6,8,10から直接言えるのは、これらの観測点における濃度は北米大陸北部またはシベリア周辺からのフラックスの影響を受けやすいという事である。しかし、この二つの領域以外、例えばヨーロッパ、アジア、北米大陸南部からのフラックスがこれらの地点における季節変動の大きな振幅(Fig.3,5,7,9)に高く寄与しているとするならば、これ

らのフラックス源により近い観測点(Fig.11,13,15)ではさらに大きな季節変動が観測されるはずである。高緯度の観測点ほど季節変化の振幅が大きいという事は、高緯度の陸上において夏季に強い吸収が行われた可能性が極めて高いと考えられる。

井口・木田(2004,2005)がSim-CYCLEを用いて行った大気中CO<sub>2</sub>濃度分布のシミュレーションでは、観測値が夏季に大きく濃度が下がるのに比べて濃度の低下が小さく、また9月以降観測値が急速に上昇するのに比べてモデルでは濃度の上昇が緩やかであるという季節変動における顕著な食い違いが、北半球の帯状平均濃度においても各観測点における濃度(Fig.3,5,7,9,11)においても見られた。植生活動の衛星データを用いて作成されたNASA/GISSの植生起源炭素フラックスデータ(Fung et al., 1987)と比較しても、Sim-CYCLEが計算した炭素フラックスは弱い吸収が長く続くという結果が出た。今回の輸送モデルを用いた実験の結果は、上記のSim-CYCLEの問題点についてさらに具体的に、北アメリカの高緯度やシベリア周辺における短期間で強い吸収フラックスについてモデル計算と実際との差が特に大きい事を示唆している。

北半球の他の地域に目を向けると、ヨーロッパについては季節変動の振幅について観測値とモデル値で差は小さくなく、Sim-CYCLEが吸収の強さを比較的良く再現していると思われる(Fig.15)。しかしCO<sub>2</sub>濃度が上昇する時期が観測に比べて遅く、ここにも高緯度における吸収期間が長くなるという問題点が表れている。北アメリカ大陸の南部についてはフラックスが強度・位相共に良く再現されているものと考えられる(Fig.13)。アジアについては、観測値とモデル値の振幅の差が小さく(Fig.11)、フラックスの強度は比較的良く再現されていると思われるが、シベリア周辺からのフラックスもアジアに匹敵するくらい寄与しており(Fig.11,12)、今回の結果だけでは判断は難しい。内陸の観測点も少なく、1990年以外のデータも調べてみる必要がある。

## 6. 結論

北半球における大気中CO<sub>2</sub>濃度の季節変動は高緯度ほど振幅が大きくなるが、この現象は北アメリカ大陸北部やシベリア周辺において夏季に強い吸収があり、それによって生成された低濃度の大気が極方向に輸送されることで生じる事が今回の実験結果から示された。

Sim-CYCLEを用いた従来のシミュレーションの結果を今回の実験結果と比較してみると、上記二つの

領域からのフラックスの影響を強く受ける地点において観測値とモデル値の季節変動に大きな差が見られ、これらの地域における短期間で強い吸収が正確に再現できていないことが示唆された。上記二つ以外の北半球の領域では、Sim-CYCLEが再現する炭素フラックスの強さは現実の植生とそれほど大きな差は無いと考えられる。現実の植生は生育条件を満たす期間が短い高緯度・高地において、その短い期間に活発に活動するものと思われる。Sim-CYCLEでは高緯度において弱い吸収が長期間続くという傾向が見られ、こうした点の改良は今後の重要な課題の一つである。

今回は定性的な話に終始したが、この実験は逆転法によるフラックス推定作業の一部であり、最終的には季節変化も含めた定量的な地表面炭素フラックスの推定値と誤差を求める予定である。その際には大気中CO<sub>2</sub>収支の問題およびSim-CYCLEの問題について全球規模でより詳細な議論ができるものと期待できる。

## 謝 辞

本研究で新たに行った輸送実験では、TransCom3 Layer2 で用いられているLandunit carbon flux data およびECMWF/TOGAの再解析大気データを使用しました。また従来の研究として紹介したシミュレーションで使用したSim-CYCLEは、筑波大学で開発されたものを提供していただき、独自に変更を加えたものです。図の作成には地球流体電脳倶楽部の電脳ライブラリを使用いたしました。

## 参考文献

- 井口敬雄・木田秀次(2004): グローバルモデルを用いた植生起源炭素フラックスの季節変化の研究, 京都大学防災研究所年報, 第47号B, pp.349-364.
- 井口敬雄・木田秀次(2005): グローバルモデルを用いた植生起源炭素フラックスの季節変化の研究(2) ~北半球中高緯度における季節変化~, 京都大学防災研究所年報, 第48号B, pp.455-465.
- Aoki, S., Nakazawa, T., Machida, T., Sugawara, S., Morimoto, S., Hashida, G., Yamanouchi, T., Kawamura, K., and Honda, H. (2003): Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica, *Tellus*, 55B, pp. 178-186.

- Bousquet, P., Peylin, P., Ciais, P., Quéré, C. L., Friedlingstein, P., Tans, P. P. (2000): Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980, *Science*, Vol. 290, pp. 1342-1346.
- Fung, I. Y., Tucker, C. J. and Prentice, K. C. (1987): Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere- biosphere exchange of CO<sub>2</sub>, *Journal of Geophysical Research*, 92, D3, pp.2999-3015.
- Gurney, K. R., et al. (2003): TransCom3 CO<sub>2</sub> inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information, *Tellus*, 55B, pp. 555-579.
- IPCC (2001): CLIMATE CHANGE 2001 The Scientific Basis, Cambridge University Press.
- Ito, A., and Oikawa, T. (2002), A simulation model of the carbon cycle in land ecosystem (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation, *Ecological Modelling*, 151, pp.143-176.
- Murnane, R. J., Sarmiento, J. L. and Quéré, C. L. (1999): The spatial distribution of air-sea CO<sub>2</sub> fluxes and the interhemispheric transport of carbon by the oceans, *Global Biogeochemical Cycles*, 13, pp. 287-306.
- Tans, p. p., Fung, I. Y. and Takahashi, T. (1990): Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget, *Science*, Vol. 302, pp. 852-856.
- Yamamoto, S., Murayama, S., Saigusa, N. and Kondo, H. (1999): Seasonal and inter-annual variation of CO<sub>2</sub> flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan, *Tellus*, 51B, pp. 402-413.

### **A Study of Seasonal Variation of Terrestrial Carbon Flux from Mid-high Latitudes on Northern Hemisphere Using Transport Model**

Takao IGUCHI and Hideji KIDA\*

\*Graduate School of Science, Kyoto University

#### **Synopsis**

Numerical experiments using atmospheric transport model were implemented with regional and monthly pulse CO<sub>2</sub> fluxes to evaluate their contributions to CO<sub>2</sub> concentrations at observation stations. Using evaluated contributions and observed CO<sub>2</sub> concentrations, seasonal variation of carbon flux from biosphere was investigated. The results showed that high amplitudes of observed seasonal CO<sub>2</sub> variations at northern high latitudes are produced by large absorption at northern North America and around Siberia during summer. It is also suggested that these two strong absorptions in summer may be the most significant discrepancies between seasonal CO<sub>2</sub> flux variation of real biosphere and that of the biosphere model used in our prior study.

**Keywords:** carbon dioxide, vegetation, transport model, biosphere